

文章编号: 1001—1749(2011)03—0252—06

# S 变换和 TT 变换联合压制地震面波

马见青, 李庆春

( 长安大学 地质工程与测绘学院 陕西 西安 710054)

**摘 要:** TT 变换( Time - Time transform) 是基于 S 变换的一种新的非平稳信号处理方法, 具有很好的频率聚集能力。面波的频率比反射波的频率低, 通过提取 TT 变换域的对角线元素, 就可以压制低频面波。但该方法的不足是在压制低频的同时, 也保留了部份高频干扰, 这些高频干扰可以用 S 变换来消除。首先对每一道地震数据进行 S 变换时频滤波, 把高频干扰和随机噪音压制掉, 接着做 TT 滤波, 来压制低频的面波。通过实际地震数据处理, 并传统的高通滤波方法进行对比, 充分显示了 S 变换和 TT 变换联合压制面波的有效性。

**关键词:** 面波压制; 时频分析; S 变换; TT 变换

**中图分类号:** P 631.4 **文献标识码:** A

## 0 前言

在过去的二十年, 各种各样的谱方法已经发展起来, 用来提取时间域信号的时间局部性质。小波变换是在时间序列的不同尺度上给定小波母函数, 提供该信号的局部相似性信息。类似的, S 变换<sup>[1]</sup>将一个一维的时间信号变成二维的, 包含局部时频谱性质的时间 ~ 频率谱。这些都可以看成是在遵守一定规则的前提下, 对时间信号的分解方法, 每一种方法都有其优点, 也有共同点。目前 S 变换已经在海洋、机械工程、地震勘探、医疗、高层大气物理学等领域被广泛的应用。

Robert<sup>[2]</sup>提出了 TT 变换, 它是基于 S 变换的一种谱分解方法。与 S 变换的一个共同点, 就是可以通过一个尺度窗函数, 获得一维时间信号的二维局部时间性质, 这也是 S 变换的目的。不同的是, S 变换是将一维时间信号变换到二维时间 ~ 频率域, 而 TT 变换是将一维时间信号变换到二维时间 ~ 时间域。这样, 根据信号在时间 ~ 时间域的分布特点, 可以对信号进行处理。Robert 等<sup>[3,4]</sup>利用 TT

变换进行非平稳时变信号滤波, Fan X<sup>[5]</sup>利用 TT 变换进行机械故障检测, 取得了良好的效果。由于 TT 变换在实际应用中最感兴趣的是它的对角线元素, Simon 等<sup>[6]</sup>从数学角度提出并证明了直接计算非平稳信号的 TT 谱的对角线元素, 这样就提高了计算效率, 使得该方法的实用性更强。

面波在反射地震资料中, 是属于具有低频、高振幅、强能量等特点的一种规则干扰波<sup>[7]</sup>。由于面波的存在, 常常使得有效反射波被其所覆盖, 造成反射资料的信噪比降低。因此, 面波压制的效果直接影响到地震反射资料的处理, 乃至影响偏移成像的效果, 最终影响地质解释的效果。目前, 比较流行的压制面波的方法有  $f - k$  方法<sup>[8]</sup>、Radon 变换方法<sup>[9]</sup>、S 变换时频滤波法<sup>[10]</sup>等。

作者在本文就是根据面波的特点, 对 S 变换和 TT 变换进行详细的推导和分析, 结合二者的优势, 进行实际地震面波联合压制。

## 1 S 变换和 TT 变换基本理论

信号  $h(t)$  的 S 变换  $S(\tau, f)$  定义为式(1)。

基金项目 “863” 国家高技术研究 A 类课题(2007AA06Z103); 交通部西部交通建设项目(200731881262); 长安大学科技创新计划项目(CHD2010ZY004)

收稿日期: 2010-12-08

改回日期: 2011-03-28

$$S(\tau,f)=\int_{-\infty}^{+\infty}h(t)w(t-\tau,f)\exp(-i2\pi ft)dt\tag{1}$$

式中  $w(t,f)=\frac{|f|}{k\sqrt{2\pi}}e^{(-\frac{f^2t^2}{2k^2})}$  ( $k>0$ ) 为高斯窗函数;  $\tau$  为窗函数的中心。

对式(1)两边同时作傅里叶反变换,得式(2)。

$$TT(t,\pi)=\int_{-\infty}^{+\infty}S(\tau,f)\exp(+i2\pi f\tau)df\tag{2}$$

如果对于给定的  $t$ ,考虑所有的  $\tau$ ,结果是一个时间局部方程。由于

$$\int_{-\infty}^{+\infty}TT(t,\pi)dt=h(\tau)\tag{3}$$

所以,TT 变换是完全可逆的。

把式(1)和高斯窗函数带入式(2)中,重新表达 TT 变换:

$$TT(t,\pi)=\int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty}\frac{|f|}{k\sqrt{2\pi}}h(\theta)\times e^{-(f^2(\theta-\tau)^2/2k^2)}e^{-i2\pi f(\theta-t)}d\theta df\tag{4}$$

对于连续信号  $h$ ,交换积分顺序,得到式(5)。

$$TT(t,\pi)=\int_{-\infty}^{+\infty}h(\theta)g_k(\theta-t,\pi)d\theta\tag{5}$$

这里有

$$g_k(t,\pi)=\int_{-\infty}^{+\infty}\frac{|f|}{k\sqrt{2\pi}}e^{-(f^2\tau^2/2k^2)}e^{-i2\pi ft}df\tag{6}$$

通过积分计算,可得到其解析表达式(7)。

$$g_k(t,\pi)=\begin{cases}\sqrt{\frac{2}{\pi}}\frac{k}{\tau^2}-2\pi k^2\frac{t}{\tau^3}e^{-2(\frac{\pi k(t/\tau)}{1})^2}Erfi(k\pi\sqrt{2}\frac{t}{\tau}),\\ \qquad\qquad\qquad\forall\tau\neq 0\\ -\sqrt{\frac{2}{\pi}}\frac{1}{kt^2},\tau=0\end{cases}\tag{7}$$

在式(7)中,  $Erfi$  为误差方程。可定义:

$$p_k(x)=k\sqrt{\frac{2}{\pi}}-2\pi k^2xe^{-2(\frac{\pi kx}{1})^2}Erfi(\sqrt{2}k\pi x)\tag{8}$$

则有

$$g_k(t,\pi)=\frac{1}{\tau^2}p_k(\frac{t}{\tau}),\forall\tau\neq 0\tag{9}$$

当  $t/\tau=1$ ,即在 TT 变换谱的对角线位置,有:

$$TT(t,\pi=t)=p_k(1)\int_{-\infty}^{+\infty}h(\theta)\frac{1}{(\theta-\tau)^2}d\theta\tag{10}$$

式(10)为一褶积方程,根据时间域褶积和频率域乘积的关系,有式(11)。

$$TT(t,t)=F^{-1}\{H(f)G(f)\}\tag{11}$$

式中  $F\{\cdot\}$  代表傅立叶变换;  $F^{-1}\{\cdot\}$  代表傅里叶反变换;  $H$  表示信号  $h$  的傅立叶变换;  $G$  表示  $g$  的对角线元素的傅立叶变换。

由积分变换得式(12)。

$$G(f)=F\{g(t,t)\}=-2p_k(1)\pi^2|f|\tag{12}$$

方程式(12)表明,在信号  $h$  的有效频带范围内,  $G$  与  $|f|$  成正比,  $|f|$  越大,  $G$  就越大,  $TT(t,t)$  就越大,即信号  $h$  的 TT 变换对角线元素的值就越大。这也正是由 S 变换的尺度性质(The scaling properties)导致在  $t=\tau$  附近,高频部份比低频部份的振幅更高<sup>[5]</sup>的原因所在。

尽管 S 变换和 TT 变换的解析表达式,可以通过  $h$  的积分方程得到,但更多的应用是仅知道离散采样时间信号序列  $\hat{h}$ ,此时就需要导出离散 S 变换和 TT 变换。

离散 S 变换  $\hat{S}$  的形式为式(13)。

$$\hat{S}[jT,\frac{n}{NT}]=\sum_{m=-N/2}^{N/2-1}\hat{H}[\frac{m+n}{NT}]\exp[-\frac{2\pi^2m^2}{n^2}]\exp[\frac{2\pi imj}{NT}]\tag{13}$$

式中  $N$  是时间信号的采样点数;  $T$  是采样间隔;  $j$  是没有单位的正整数;  $m$  和  $n$  为频率;  $\hat{H}$  是  $h$  的离散傅里叶变换:

$$\hat{H}[\frac{n}{NT}]=\sum_{k=0}^{N-1}h[kT]\exp[-\frac{i2\pi nk}{N}]\tag{14}$$

式中  $k$  是时间参数( $\tau=kT$ )。

离散 TT 变换  $\hat{TT}$  的形式见式(15)。

$$\hat{TT}[jT,kT]=\sum_{n=-N/2}^{N/2-1}\hat{S}[jT,\frac{n}{NT}]\exp[\frac{2\pi ink}{N}]\tag{15}$$

$\hat{TT}$  的逆变换形式为式(16)。

$$\sum_{j=0}^{N-1}\hat{TT}[jT,kT]=\hat{h}[kT]\tag{16}$$

为了进一步解释 S 变换和 TT 变换的性质,对一模型数据进行 S 变换和 TT 变换分析。

见下页图 1(a) 是一个人工合成信号,由频率为 6 Hz、25 Hz 和 52 Hz 的三个余弦信号组成。其中,在频率为 6 Hz 的低频背景上,叠加了一个频率为 52 Hz 的高频成份;图 1(b) 是合成信号的 S 变换时频谱,有较好的时频分辨率,可将不同频率的信号成份一一分开;图 1(c) 是合成信号的 TT 变换谱,图 1(c) 中的色带越宽,表示频率越低,例如合成信号的 1 个~127 个采样点为一低频背景,对应

于 TT 变换谱中的  $[1:127, 1:127]$  的对角线位置的色带就比较宽。颜色的深、浅,表示能量的大小。颜色越深,表示能量越高。由此可见,在 TT 变换谱中,对角线部位的能量,要比远离对角线元素的

位置的能量要高;图 1( d) 是合成信号的 TT 反变换,可以看到,反变换后的信号和原信号完全一致,这进一步检验了程序的正确性和 TT 变换的无损可逆性;图1( e) ~ 图1( g) 为 TT 谱中某一确定的

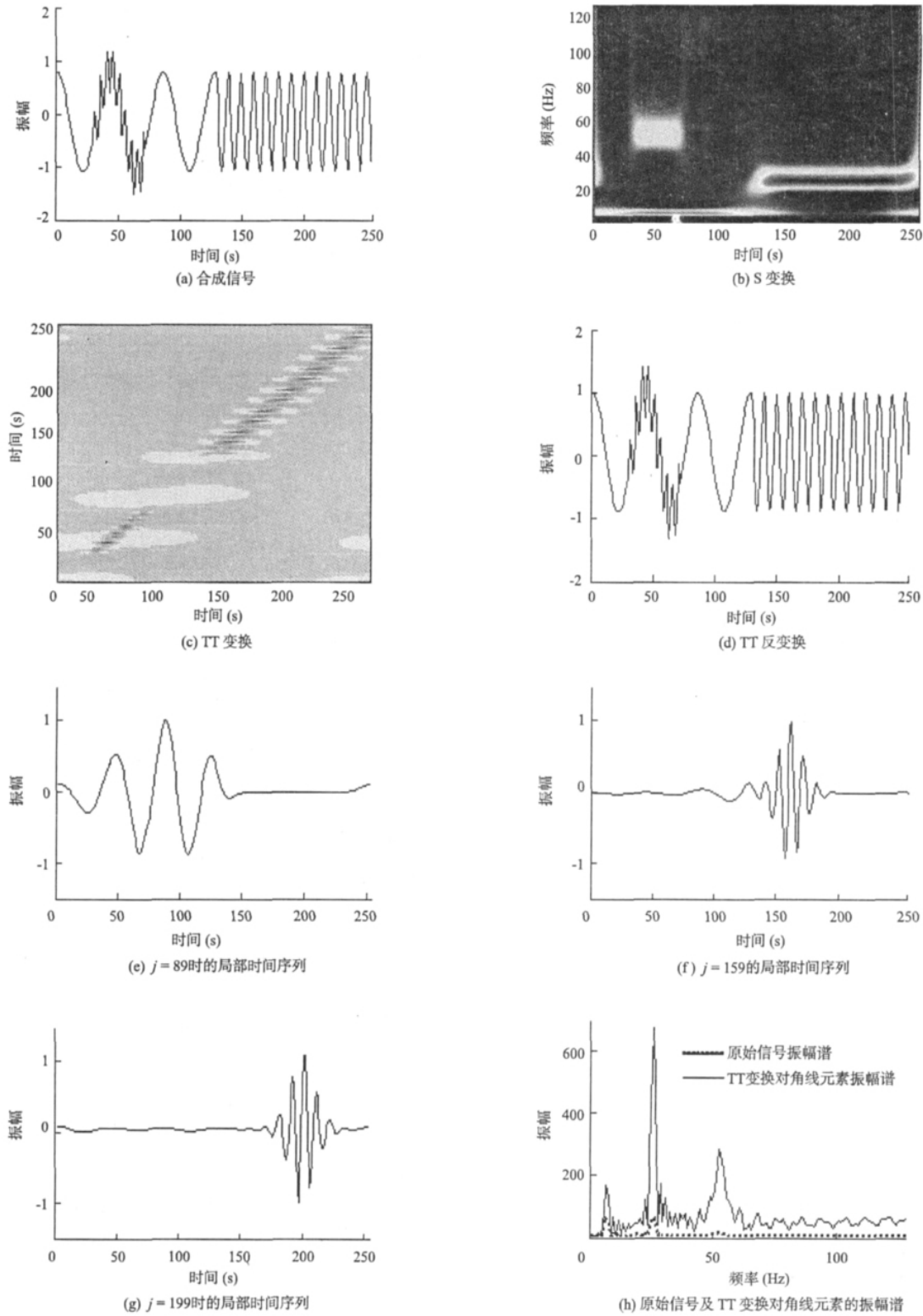


图 1 合成信号的 S 变换及 TT 变换

Fig. 1 The S-transformation and TT-transformation of synthetic signal

时间点所对应的时间序列 ,从图 1( e) ~ 图1( g) 中可以看到 ,只在  $k=j$  的附近 ,高频成份比低频成份的聚集能力更强。也就是说 ,频率越高 ,以对角线元素为中心的分布范围越窄 ,而低频分布的较宽 ,因此越靠近对角线的地方 ,累加的频率成份越多 ,振幅也就越高;图 1( h) 为原始信号的傅氏变换及 TT 变换的对角线元素的傅氏变换 ,表明在压制掉低频信号后 ,突出了高频信号 ,频率越高 ,同一频率在变换后与变换前的增强的比例越大。

通过理论分析和数值模拟 ,我们可以总结出 S 变换和 TT 变换的基本性质:

- (1) S 变换为一线性变换 ,具有无损可逆性 ,其反变换和傅里叶变换有着直接的联系 ,有很好的时频分辨率。
- (2) TT 变换具有无损可逆性 ,在 TT 谱的对角线位置附近 ,高频信号的聚集能力比低频信号的更强 ,分布范围更窄 ,振幅也就更高。这也为 TT 变换在实际应用中提供了理论基础。

## 2 基于 TT 变换的地震面波压制

图 2( a) 是某野外实际地震炮的记录 ,采样间隔为 2 ms ,道间距为 25 m。从图 2 可以看出 ,在近偏移距道面波非常发育 ,且有明显的频散。图 2( b) 是利用 TT 变换压制面波后的记录 ,可以清楚地看到 ,低频的面波得到了有效的压制 ,而比面波频率要高的其它地震波 ,仍然清晰的保留 ,尤其是湮没在面波记录中的反射同相轴变得更加连续。图 2( c) 是利用截止频率为 18 Hz 的高通滤波衰减面波后的记录 ,同样取得了效果。

图 3、图 4( 见下页) 分别为第 55 道原始数据和利用上述两种方法进行压制面波后的时频谱和 TT 谱。同样 ,在时频谱和 TT 谱中 ,面波所分布的区域全部被压制 ,但与作者在本文中所用的方法相比 ,利用传统的高通滤波方法处理后 ,在炮集记录中仍存在能量较强的面波 ,且波形存在畸变。经实

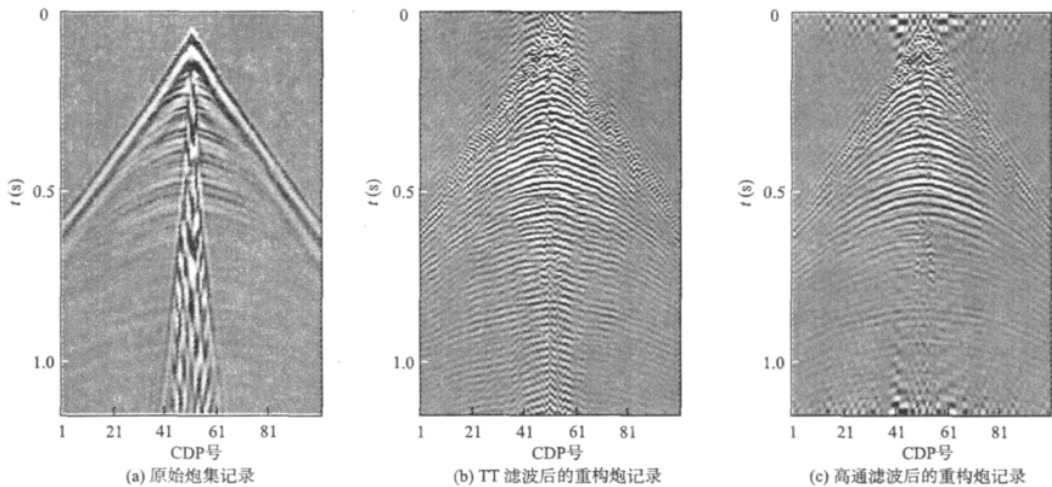


图 2 实际资料试算  
Fig. 2 Real seismic data processing

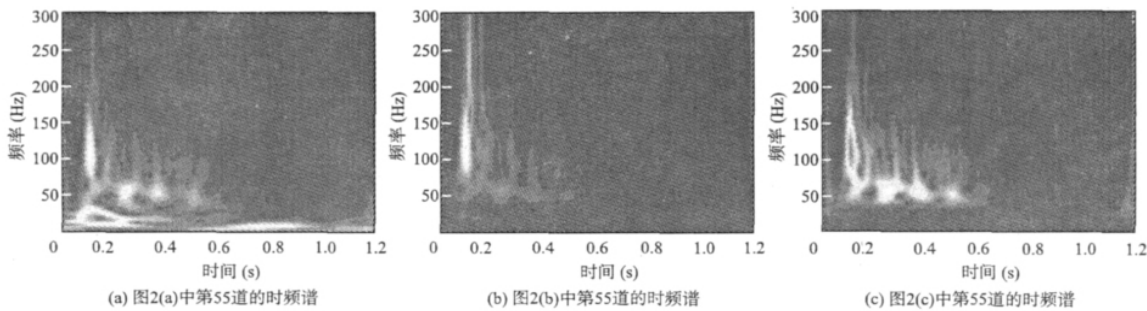


图 3 实际资料单道信号时频分析  
Fig. 3 Time-frequency analysis of single trace in real seismic data

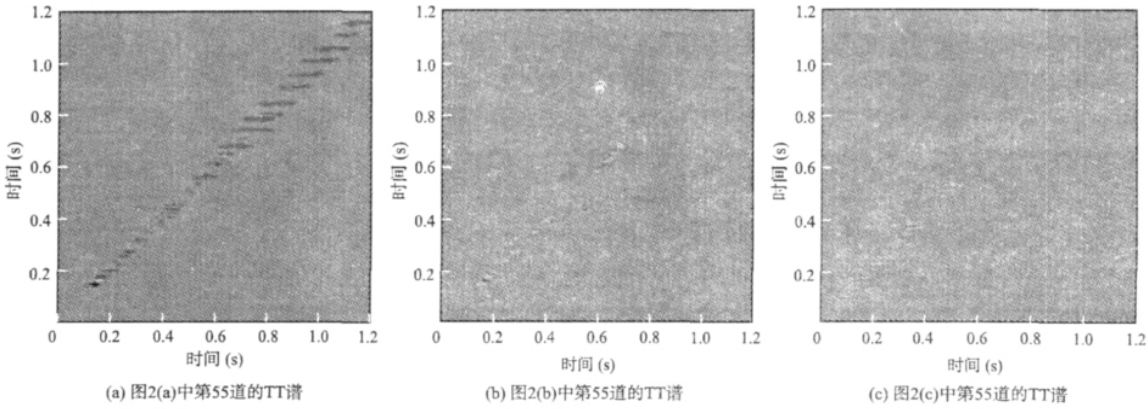


图 4 实际资料单道信号 TT 谱分析

Fig. 4 TT-spectrum analysis of single trace in real seismic data

际资料的处理充分表明,TT 变换在压制面波方面具有优势。

### 3 S 变换和 TT 变换联合压制地震面波的原理

利用 TT 变换进行面波压制,由于使用了快速傅里叶变换,因此计算效率很高。但有一个缺陷,就是在提取高频、压制低频的同时,也漏掉了一些低频的有效信号,同时也保留了部份高频干扰,这样就改变了压制面波干扰后的记录的振幅。而利用 S 变换,就可以将时间域信号变换到时频域,通过时频滤波器,将干扰信号的区域填充为零,然后利用 S 反变换,将滤波后的时频谱变换到时间域。由于 S 变换具有线性的性质和无损可逆性质,因此在利用其 S 正变换、S 反变换实现信号在时间域和时频域之间变换的过程中,就不会产生交叉项,而且不会造成信息损失。

介于 TT 变换存在上述不足,这里,我们将尝试利用 S 变换和 TT 变换联合来压制地震面波。该方法的基本思路就是:

- (1) 首先对每一道地震数据做 S 变换,进行时频滤波,把高频干扰和随机噪音压制掉。
- (2) 接着对压制过高频噪音和随机噪音的地震记录进行 TT 变换滤波,利用 TT 变换良好的频率聚集能力,在 TT 域提取对角线附近的元素,来压制低频的面波。

图 5 是利用 S 变换和 TT 变换,联合来压制图 2(a) 所示的地震记录中的面波。

图 6 为联合压制面波之后的单道记录的时频谱。

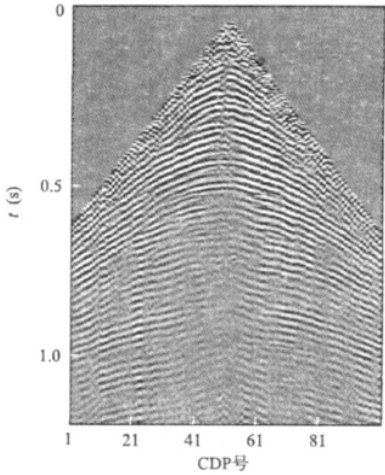


图 5 S 变换和 TT 变换联合压制面波后的记录  
Fig. 5 Surface wave record suppressed by S and TT transformation

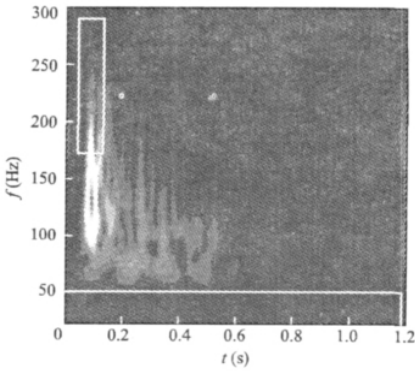


图 6 S 变换和 TT 变换联合压制面波后的第 55 道记录时频谱  
Fig. 6 Time-frequency spectrum of 55th trace after surface wave suppressed by S and TT transformation

对比图 2( b) 与图 5、图 2( c) 与图 6 可以清楚地看到 , 经 S 变换时频滤波 , 将高频干扰滤除之后 , 再利用 TT 变换压制面波 , 其效果比单独采用 TT 变换压制面波的效果要更明显 , 面波记录彻底被压制 , 同时还保留了反射波等有效信号。

#### 4 结论

通过理论分析 , 数值模拟 , 以及实际资料的处理 , 我们可以得到以下结论:

( 1) TT 变换实际上是 S 变换的延伸 , 和 S 变换有着密切的联系 , 都具有无损可逆性。

( 2) TT 变换具有很好的频率聚集能力 , 在其对角线位置附近 , 高频信号的聚集能力比低频信号的更强 , 分布范围更窄 , 振幅也就更高。

( 3) 虽然 TT 变换在压制面波方面有明显的效果 , 但其在提取高频 , 压制低频的同时 , 也漏掉了一些低频的有效信号 , 同时也保留了部份高频干扰 , 这是 TT 变换在信号分析中的不足之处。

( 4) 将 TT 变换和 S 变换统一起来进行分析和应用 , 这样就可以避免一些解释上的假象 , 并用该方法进行实际地震面波压制 , 取得了良好的效果。

作者在本文是首次将 TT 变换引入到地震数据处理中 , 由于涉及到该方法的文献较少 , 因此 , 该方法的更多性质和应用 , 以及它和时频分析之间的联系等方面的工作 , 有待于我们的进一步探索和挖掘。

#### 参考文献:

[1] STOCKWELL R G , MANSINHA L , P. LOWE R. Local-

ization of the complex spectrum: the S transform [J]. IEEE transactions. on signal processing ,1996 ,44( 4) : 998.

[2] ROBERT C , PINNEGAR. The generalized S-transform and TT-transform in one and two dimensions [D]. The university of Western Ontario London Ontario 2001.

[3] ROBERT C , PINNEGAR , MANSINHA C. A method of time-time analysis: The TT-transform. Digital [J]. signal Processing. A Review Journal 2003 ,13: 588.

[4] ROBERT C R. Time-frequency and time-time filtering with the S - transform and TT-transform [J]. Digital signal Processing: A Review Journal 2005 ,15: 604.

[5] FAN X , ZUO M. Gearbox fault detection using Hilbert and TT-transform [J]. Key Eng Mater 2005 293: 79.

[6] SIMON C , SCHIMMEL M , DANOBEITIA J. On the TT-transform and its diagonal elements [J]. IEEE transactions. on signal processing 2008 ,56( 11) : 5709.

[7] 杨成林. 瑞雷波勘探 [M]. 北京: 地质出版社 ,1993.

[8] 刘发启 , 张关泉. 小波变换与 F - K 算法在滤波中的应用 [J]. 石油地球物理勘探 ,1996 ,31( 6) : 782.

[9] 巩向博 , 韩立国 , 王恩利 , 等. 压制噪声的高分辨率 Radon 变换法 [J]. 吉林大学学报: 地球科学版 2009 , 39( 1) : 152.

[10] 陈爱萍 , 邹文. 基于 S - 变换的面波压制 [J]. 世界地质 2005 24( 1) : 82.

作者简介: 马见青( 1984 - ) , 男 , 山西忻州人 , 博士 , 主要从事地震信号时频处理及多波多分量极化分析的研究。

model; and (3) implementing time-depth conversion for target layers using the revised velocity model. Real seismic data processing in Erlian Basin shows that the transversely variable 3D seismic velocity model can be used to improve complex structure mapping.

**Key words:** 3D seismic velocity model; time-depth conversion; structure mapping; pre-stack time migration; erlian basin

### **SUPPRESSING NUMERICAL DISPERSION IN FINITE DIFFERENCE MODELING BASED ON ACOUSTIC AND ELASTIC EQUATION USING FCT SCHEME**

LI Wen-jie, ZHANG Gai-lan, JIANG Da-jian, et al. (Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China). *COMPUTING TECHNIQUES FOR GEOPHYSICAL AND GEOCHEMICAL EXPLORATION*, 2011, 33(3): 248

Numerical dispersion inevitably exists in numerical simulation based wave equation, which is also called grid dispersion and usually affect the result of numerical simulation badly, therefore, in the process of numerical simulation, the problem must be managed to solved. On the basis of the research result the other people have achieved, the paper uses the flux-correction transformation scheme to eliminate numerical dispersion existing in numerical simulation based on elastic wave equation in isotropic media. The result of numerical simulation shows that the scheme can eliminate the numerical dispersion effectively and improve the quality of numerical simulation greatly.

**Key words:** elastic wave equation; isotropic media; finite difference; numerical dispersion; FCT scheme

### **JOINT S TRANSFORMATION AND TT-TRANSFORMATION METHOD OF SURFACE WAVE SUPPRESSION**

MA Jian-qing, LI Qing-chun (School of Geological Engineering and Surveying, Chang'an University, Xi'an 710054, China). *COMPUTING TECHNIQUES FOR GEOPHYSICAL AND GEOCHEMICAL EXPLORATION*, 2011, 33(3): 252

TT transformation (Time-Time transformation) is a new method to process non-stationary signal based on S-transform, it has a good ability of frequency conversion. The surface wave, with lower frequency compared with other seismic wave, can be suppressed through extracting the TT spectrum's diagonal elements of seismic data. However, this method has a deficiency that in pressing low-frequency signal, a part of high-frequency interference is retained that can be eliminated by S transformation. Firstly, we apply S transform time-frequency filtering for each trace seismic data to suppress the high frequency interference and random noise, then, use TT filtering to suppress the surface wave with low frequency. Finally, we use this method to real seismic data processing, and compare it with the traditional high-pass filter method. The result reflects the effective of TT transform in suppressing surface wave.

**Key words:** surface wave suppression; time-frequency analysis; S-transformation; TT-transformation

### **WAVEFORM CONSISTENCY SHAPING METHOD AND APPLICATION IN SEISMIC MERGING PROCESSING IN DAQING XUJIAWEIZI DEEP GAS RESERVOIR**

CHEN Bin (Exploration and Development Research Institute of Daqing Oilfield Company Ltd., Daqing Helongjiang 163712, China). *COMPUTING TECHNIQUES FOR GEOPHYSICAL AND GEOCHEMICAL EXPLORATION*, 2011, 33(3): 258

Waveform consistency is an important factor in seismic merging processing, the waveform difference is small in seismic data processing of single block because the properties of the sources and receivers are similar. The wavelet amplitude, frequency and phase are different in multi-blocks processing because the data acquisition is in different time and also, the data has different source and receiver properties. The method of frequency consistency, amplitude consistency and deconvolution are applied to adjust the relationship between wavelet frequency and phase for different seismic data and different blocks in conventional seismic data processing, but the above consistency processing can reduce the seismic data prestack processing quality. The unified waveform consistency processing is presented in this paper, the proposed method can eliminate the waveform difference which results from the source type and acquisition factor in different blocks, the crosscorrelation coefficient of wavelet in different block is above 0.9, that means, the original data quality is kept efficiently during the course of prestack consistency processing. We have got good result in waveform consistency processing in 19 blocks, about 5 058.8 km<sup>2</sup> in Xujiaweizi, this is also the biggest 3D seismic onshore data merging processing in China.

**Key words:** seismic data merging processing; waveform consistency; wavelet shaping; crosscorrelation coefficients; prestack migration

### **ABSORPTION COEFFICIENT EXTRACTING METHOD BASED ON DYNAMIC WAVELET ESTIMATION**

CAO Jian, ZHAO Xian-sheng, SHI Ze-jin, et al. (Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China). *COMPUTING TECHNIQUES FOR GEOPHYSICAL AND GEOCHEMICAL EXPLORATION*, 2011, 33(3): 264

Wavelet extraction based on convolution-model, we often assume the minimum-phase wavelet. Although phase shift and Q-compensation can be adopted in seismic data processing, the extracted wavelets from real seismic data is mostly mixed-phase. The most common way to extract absorption coefficient is seismic trace spectrum modeling, i. e. using the smoothed amplitude spectrum of the seismic trace to substitute wavelet amplitude spectrum, but this brings in error, also create more uncertainty while interpre-